

ИНГИБИРОВАНИЕ КОРРОЗИИ И ЗАДЕРЖИВАЮЩЕЕ ПАССИВАЦИЮ ДЕЙСТВИЕ ЛАУРОАМИДПРОПИЛБЕТАИНА НА ЦИНК В ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЕ

© 2020 г. Л. Х. Чжоу^a, Х. Х. Лю^a, К. Л. Лю^a, П. Хе^{a, b, *}, С. Ванг^a, Л. П. Цзя^a,
Ф. К. Донг^c, Д. С. Лю^a, Л. С. Ду^a

^aГосударственная основная лаборатория экологически чистых энергетических материалов,
Школа материаловедения и технологии, Юго-Западный университет науки и технологии,
Мяньян, Сычуань, 621010 КНР

^bMianyang Kingtiger New Energy Technology Co., Ltd., Мяньян, Сычуань, 621000 КНР

^cОсновная лаборатория обращения с твердыми отходами и переработки ресурсов Министерства образования,
Мяньян, Сычуань, 621010 КНР

*e-mail: hepingswust@swust.edu.cn

Поступила в редакцию 21.06.2019 г.

После доработки 24.10.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Влияние лауроамидпропилбетаина на коррозию и пассивацию цинка исследовано в 7.0 М растворе КОН, насыщенном ZnO, с помощью кривой поляризации Тафеля, электрохимической импедансной спектроскопии и вольтамперометрии с линейной разверткой. Это демонстрирует, что лауроамидпропилбетаин действует как ингибитор катодного типа и сдерживает коррозию цинка в щелочной среде, уменьшая выделение водорода. С увеличением концентрации лауроамидпропилбетаина эффект ингибирования коррозии и сопротивление переносу заряда цинкового электрода усиливается, а эффективность ингибирования коррозии достигает 84.1% в присутствии 800 ч/млн лауроамидпропилбетаина. Подтверждено, что адсорбция лауроамидпропилбетаина на поверхности цинкового электрода соответствует модели изотермы Ленгмюра. Кроме того, кривые анодной поляризации показывают, что небольшое количество лауроамидпропилбетаина выгодно для задержки пассивации цинкового электрода. Результаты показывают, что коррозия поверхности цинка уменьшается в щелочной среде в присутствии 800 ч/млн лауроамидпропилбетаина.

Ключевые слова: цинковый электрод, коррозия, пассивация, лауроамидпропилбетаин, поверхностно-активное вещество

DOI: 10.31857/S0424857020080034

ВВЕДЕНИЕ

Цинк широко используется в качестве анодных материалов для первичных и вторичных цинковых батарей [1–6], поскольку он недорогой, нетоксичный, широко распространенный и способен обеспечивать высокую удельную мощность и т.д. Кроме того, по сравнению с другими анодными материалами цинк обладает уникальными физическими и химическими свойствами, облегчающими его широкое промышленное применение.

При этом характеристики цинкового электрода ухудшаются из-за коррозии и пассивации в щелочной среде [7–10]. Коррозия цинкового электрода в щелочной среде происходит из-за образования смешанного оксидного и гидроксидного слоя на поверхности. Пассивация цинкового электрода идентифицируется как образование

слоя оксида цинка (ZnO) на его поверхности. Для решения этих проблем исследования в основном посвящены подавлению коррозии цинкового электрода. Kheawhom и соавторы сообщили, что использование 0.2 мМ додецилсульфата натрия и 100 ч/млн Pluronic F-127 в 7.0 М растворе КОН может эффективно ингибировать коррозию и пассивацию цинкового электрода [11]. Li и др. сообщили, что добавление 0.05% имидазола (IMZ) и 0.05% полиэтиленгликоля 600 (PEG) в 3.0 М растворе КОН может привести к синергетическому эффекту между IMZ и PEG, что эффективно сдерживает коррозию цинка [12]. До настоящего времени два типа добавок широко использовались для подавления коррозии цинка. Одним из них являются неорганические ингибиторы с высоким перенапряжением выделения водорода, которые могут изменять свойства цинка [13]. Од-

нако некоторые неорганические ингибиторы вредны для окружающей среды, что затрудняет их практическое использование в больших масштабах. Другой тип представляют собой органические ингибиторы, которые могут замедлить коррозию цинка. В частности, поверхностно-активные вещества широко используются в качестве добавок к электролиту благодаря их адсорбционным свойствам на поверхности металлов [14–16]. Кроме того, поверхностно-активные вещества также применяются в качестве добавок, чтобы ингибировать пассивацию цинкового электрода, и, таким образом, использование цинка улучшается.

Хорошо известно, что поверхностно-активные вещества представляют собой органические соединения, состоящие из двух частей: гидрофильной и гидрофобной групп. В общем, поверхностно-активные вещества адсорбируются на поверхности электродов в процессе электрохимической реакции, и адсорбционные характеристики тесно связаны с концентрациями поверхностно-активных веществ [17]. Кроме того, адсорбция поверхностно-активных веществ на поверхности электрода оказывает сильное влияние не только на катодную реакцию, но и на анодную реакцию [18, 19]. Тем не менее, подробные исследования предыдущих публикаций показывают, что редко наблюдалось влияние добавки электролита как на коррозию, так и на поведение пассивации цинкового электрода в щелочной среде.

В настоящей работе влияние лауроамидпропилбетаина (LAB) на коррозионные и пассивирующие свойства цинка в 7.0 М растворе гидроксида калия, насыщенном оксидом цинка, оценивалось с помощью поляризационной кривой Тафеля, электрохимической импедансной спектроскопии (EIS), вольтамперометрии с линейной разверткой и автоэлектронной сканирующей микроскопии (FE-SEM). Адсорбционные характеристики цинка были оценены с использованием модели изотермы адсорбции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и методы

LAB был приобретен у Chengdu Chemical Reagent Co., Ltd. (Чэнду, Китай). Гидроксид калия, ацетон, оксид цинка и листовый цинк (чистота 99.99%) были приобретены у Shanghai Jinshan Jingwei Chemical Co., Ltd. (Шанхай, Китай). Все реагенты использовали во всех экспериментах в полученном виде без дальнейшей очистки.

Электролит, использованный на протяжении всего эксперимента, представлял собой 7.0 М раствор гидроксида калия, насыщенный оксидом цинка. Деионизованная вода была получена с помощью системы Barnstead E-Pure.

Обработка поверхности цинковых электродов

Поверхность цинкового электрода была покрыта эпоксидной смолой, за исключением исследуемой поверхности. Перед каждым экспериментом цинковые листы последовательно шлифовали наждачной бумагой 800, 2000 и 4000 соответственно, а затем порошками оксида алюминия 500 и 50 нм до появления зеркальной поверхности. В конце цинковые листы поочередно очищали деионизованной водой и обезжиривали ацетоном.

Гравиметрическое исследование

Перед исследованием готовили 7.0 М растворы гидроксида калия, насыщенные ZnO, содержащие 0, 200, 400, 600 и 800 ч/млн LAB. Массы предварительно обработанных цинковых листов регистрировали как m_1 , а затем цинковые листы погружали в вышеупомянутые растворы на 15 сут. Впоследствии листы цинка после погружения несколько раз промывали деионизованной водой и затем сушили при температуре окружающей среды в течение 24 ч. Наконец, конечные массы цинковых листов после погружения были записаны как m_2 . В тех же условиях проводили параллельные эксперименты с тремя группами, а средние значения обрабатывались как данные гравиметрических испытаний. Скорость коррозии рассчитывали по следующей формуле:

$$v = (m_1 - m_2)/(St). \quad (1)$$

Здесь v представляет собой скорость коррозии, m_1 и m_2 представляет собой массы цинкового листа до и после эксперимента соответственно, S представляет собой площадь поверхности листа цинка, и t — время эксперимента.

Эффективность ингибирования коррозии LAB рассчитывали по следующей формуле:

$$\beta = [(v_0 - v_1)/v_0] \times 100\%. \quad (2)$$

Здесь β представляет собой эффективность ингибирования коррозии LAB, v_0 и v_1 представляют собой скорости коррозии листов цинка в растворах гидроксида калия без добавления и с добавлением LAB соответственно.

Электрохимические измерения

Типичная трехэлектродная ячейка была создана для электрохимических измерений на электрохимической рабочей станции PARSTAT 2273 (Princeton Applied Research, США). Кусок пеноникеля, обработанный цинковый лист (эффективная площадь поверхности 0.50 см²) и электрод Hg/HgO (7.0 М раствор гидроксида калия) использовали, соответственно, в качестве противоиэлектрода, рабочего электрода и электрода сравнения.

Поляризационные кривые Тафеля были выполнены при скорости сканирования 1.0 мВ с^{-1} в диапазоне потенциалов от -1.60 до -1.25 В . Измерения EIS были получены при потенциале разомкнутой цепи (ОСР) в установившемся режиме с амплитудой 5 мВ в диапазоне частот от 10^5 до 10^{-2} Гц после погружения цинкового электрода в насыщенный оксидом цинка 7.0 М раствор гидроксида калия течение 1 часа. Полученные данные EIS были аппроксимированы с помощью программного обеспечения ZSimpWin. Кривые анодной поляризации регистрировали при скорости сканирования 1 мВ с^{-1} в диапазоне потенциалов от -1.40 до -0.90 В . Все электрохимические измерения проводили при температуре окружающей среды.

Анализ FE-SEM

Морфологию поверхности образцов цинка наблюдали с помощью FE-SEM (JSM-6360LV, Япония). Перед наблюдением необходимо погрузить листы цинка в насыщенный 7.0 М раствор гидроксида калия, содержащий оксид цинка и LAB, на 30 сут при температуре окружающей среды. В конечном итоге листы цинка были тщательно очищены деионизованной водой и высушены в вакууме.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ гравиметрического исследования

Данные гравиметрического исследования приведены в табл. 1 и на рис. 1. Можно видеть,

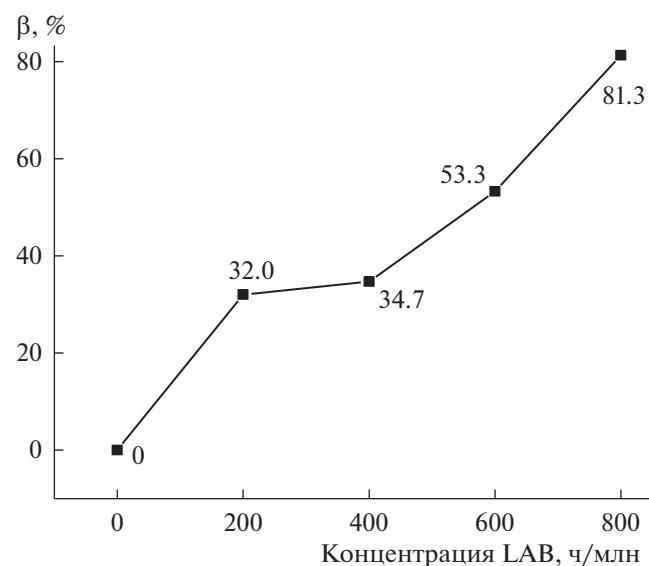


Рис. 1. Взаимосвязь эффективности ингибирования коррозии и концентрации LAB.

Таблица 1. Данные о коррозии цинка в 7.0 М растворах гидроксида калия с различными концентрациями LAB

LAB, ч/млн	$v \times 10^{-5}, \text{ мг мм}^{-2} \text{ ч}^{-1}$	$\beta, \%$
0	10.41	0.00
200	7.083	32.0
400	6.805	34.7
600	4.861	53.3
800	1.944	81.3

что эффективность ингибирования коррозии LAB была пропорциональна концентрации LAB в 7.0 М растворе гидроксида калия, насыщенном ZnO. Когда концентрация LAB составляла 800 ч/млн , эффективность ингибирования коррозии составляла до 81.3% , что объяснялось образованием защитного покрытия на поверхности цинкового электрода вследствие адсорбции LAB. Результаты подтвердили, что соответствующее добавление LAB в щелочной раствор оказало положительное влияние на ингибирование коррозии цинкового электрода.

Поляризационные кривые Тафеля цинковых электродов в щелочной среде

Поляризационные кривые Тафеля (рис. 2) цинковых электродов были испытаны при скорости сканирования 1.0 мВ с^{-1} в 7.0 М растворе гидроксида калия, насыщенном оксидом цинка в присутствии LAB. Наблюдается, что катодный ток заметно уменьшается в присутствии LAB в щелочной среде, что указывает на то, что катод-

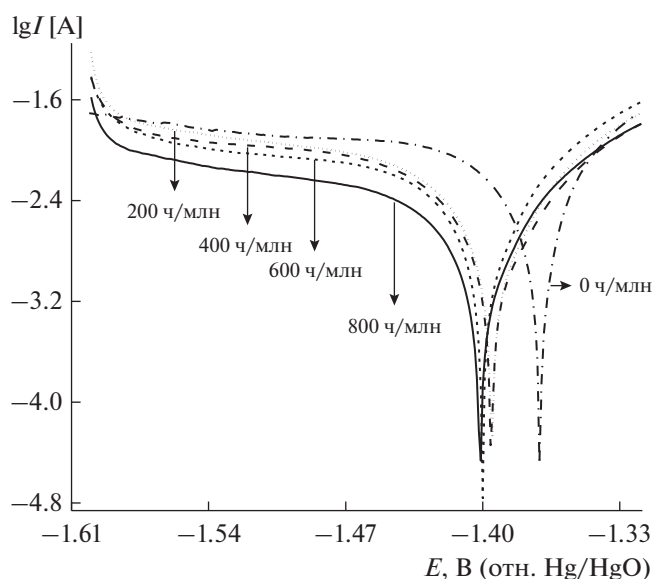


Рис. 2. Тафелевские кривые поляризации цинковых электродов в щелочной среде, содержащей различные концентрации LAB.

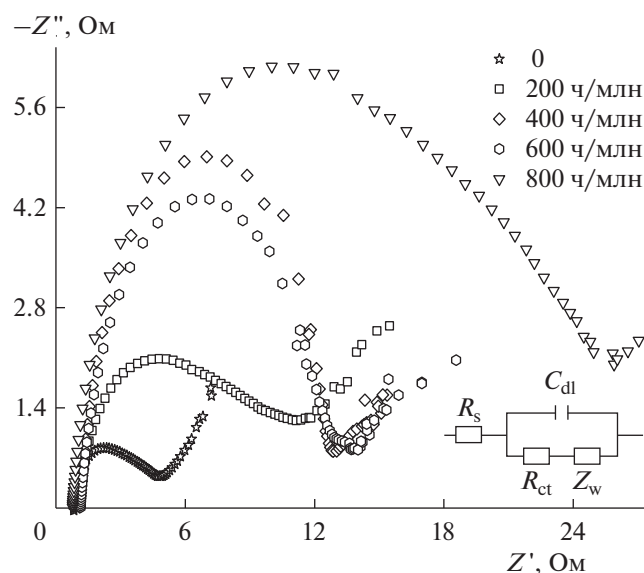


Рис. 3. Графики Найквиста цинковых электродов в щелочной среде, содержащей различные концентрации LAB. На вставке представлена модель эквивалентной схемы.

ные реакции выделения водорода были эффективно подавлены. Более того, как показано на рис. 2, в катодной и анодной ветвях не наблюдалось никаких явных изменений при добавлении LAB, что объясняется отсутствием изменений механизма реакции как в катодной, так и в анодной реакциях [20].

В табл. 2 представлены соответствующие параметры электрохимической коррозии, т.е. эффективность ингибирования коррозии (η_T , %), плотность тока коррозии ($j_{\text{корр}}$) и потенциал коррозии ($E_{\text{корр}}$), полученные из поляризационных кривых Тафеля. Основываясь на $j_{\text{корр}}$, значения η_T , % рассчитывали по формуле (3) следующим образом [21, 22]:

$$\eta_T, \% = \left(j_{\text{корр}}^0 - j_{\text{корр}} \right) / j_{\text{корр}}^0 \times 100\%. \quad (3)$$

Таблица 2. Кинетические параметры коррозии и эффективность ингибирования коррозии цинковых электродов в щелочной среде, содержащей различные концентрации LAB

LAB, ч/млн	$E_{\text{корр}}$, В	$j_{\text{корр}}$, мА см^{-2}	η_T , %
0	-1.371	27.18	—
200	-1.395	13.80	49.2
400	-1.396	11.49	57.7
600	-1.401	11.25	58.6
800	-1.405	7.80	71.3

Здесь $j_{\text{корр}}$ и $j_{\text{корр}}^0$ представляют собой плотности тока коррозии в присутствии и отсутствие LAB соответственно [23].

Как указано в табл. 2, было очевидно, что значения $E_{\text{корр}}$ смешались в область отрицательных значений с добавлением LAB по сравнению со значением без добавления LAB. Между тем, существование LAB привело к заметному сдвигу в сторону более низких плотностей тока в катодной ветви кривых поляризации Тафеля (рис. 2). Результат означал, что катодная реакция процесса коррозии сдерживалась добавлением LAB, а LAB служил ингибитором катодного типа для коррозии цинка с адсорбцией на поверхности цинка [24].

Было отмечено, что, с одной стороны, когда концентрация LAB повысилась с 0 до 800 ч/млн в 7.0 М растворе гидроксида калия, насыщенном оксидом цинка, плотность тока коррозии цинкового электрода резко снизилась с 27.18 до 7.80 мА см^{-2} , указывая, что LAB выступал в качестве высокоэффективного ингибитора коррозии цинка в щелочной среде.

С другой стороны, при увеличении концентрации LAB от 200 до 800 ч/млн эффективность ингибирования коррозии возросла с 49.2 до 71.3%. Результаты показали, что добавление LAB эффективно сдерживало коррозию цинкового электрода в щелочной среде.

EIS цинковых электродов на ОСП

На рис. 3 показаны графики Найквиста цинковых электродов в 7.0 М растворе гидроксида калия, насыщенном оксидом цинка, содержащего различные концентрации LAB. Графики Найквиста демонстрировали полуокружность и прямую линию на более высокой и более низкой частотной области соответственно. Полуокружность в области более высоких частот была объяснена поведением переноса заряда цинкового электрода [25]. Прямая линия в области низких частот была приписана диффузионному свойству Варбурга, контролируемому миграцией растворимых частиц с поверхности цинкового электрода в объем раствора.

На основе графиков Найквиста была применена модель эквивалентной схемы (диаграмма на вставке рис. 3) для аппроксимации данных EIS с помощью программного обеспечения ZSimpWin [17, 26]. Электрохимические параметры сопротивления раствора (R_s), сопротивления переноса заряда (R_{ct}) и емкости двойного слоя (C_{dl}), полученные из графиков Найквиста и модели эквивалентной схемы, приведены в табл. 3. Значения

η_T , % рассчитывали по следующей формуле (2) [27], и результаты приведены в табл. 3.

$$\eta_T, \% = (R_{ct} - R_{ct}^0) / R_{ct} \times 100. \quad (4)$$

Здесь R_{ct} и R_{ct}^0 представляют собой сопротивления переноса заряда в присутствии и отсутствие LAB соответственно.

Как показано в табл. 3, с повышением концентрации LAB значения R_{ct} увеличивались, что позволяет предположить, что покрытие, сформированное на поверхности цинкового электрода, оказало значительное влияние на защиту цинкового электрода вследствие адсорбции LAB. Между тем, электронная емкость резко уменьшилась из-за адсорбции LAB на поверхности цинкового электрода путем замещения молекул воды и других ионов, способствуя увеличению сопротивления переноса заряда [28].

Более того, значения C_{dl} снижались с увеличением концентрации LAB. Уменьшение значений C_{dl} объясняется уменьшением диэлектрической проницаемости и/или увеличением толщины защитного слоя на поверхности цинкового электрода [29, 30]. Результаты подтвердили, что добавка LAB ингибировала коррозию цинка путем адсорбции на границе раздела металл/раствор [31].

Эффективность ингибирования коррозии цинковых электродов в 7.0 М растворе гидроксида калия, насыщенном оксидом цинка, резко возросла с 57.6 до 84.1% при увеличении концентрации LAB с 200 до 800 ч/млн, что соответствовало данным, полученным в результате анализа поляризационных кривых Тафеля.

Изотерма адсорбции

Для исследования адсорбции LAB на поверхности цинка были изучены изотермы адсорбции. Как всем известно, изотермы адсорбции могут предоставить соответствующую информацию о взаимодействии между ингибитором и поверхностью металла. Следовательно, степень покрытия поверхности (θ) для LAB с различными концентрациями была рассчитана для представления наилучшей изотермы адсорбции. При этом данные, полученные по поляризационным кривым Тафеля и измерениям EIS, были использованы для подгонки изотерм адсорбции Фрейндлиха и Ленгмюра [32]. Было доказано, что изотерма Ленгмюра была наиболее благоприятной моделью. Формула изотермы адсорбции Ленгмюра выглядит следующим образом [33, 34]:

$$c/\theta = 1/K_F + c. \quad (5)$$

Здесь K_F представляет собой константу равновесия Ленгмюра, c представляет собой концентрацию LAB и θ представляет собой степень покры-

Таблица 3. Электрохимические параметры, полученные из графиков Найквиста и эквивалентной схемы цепи цинковых электродов в щелочной среде, содержащей различные концентрации LAB

LAB, ч/млн	R_s , Ом	R_{ct} , Ом	C_{dl} , мкФ	η_T , %
0	0.95	2.947	114.70	—
200	1.25	7.109	77.06	57.6
400	0.77	10.15	72.71	71.0
600	1.26	11.09	50.55	73.4
800	0.90	18.58	47.80	84.1

Таблица 4. Значения параметров изотермы адсорбции Ленгмюра LAB на поверхности цинковых электродов

Методы	R^2	Наклон
Тафель	0.94	0.53
EIS	0.98	0.60

тия поверхности. Среди них значения θ были рассчитаны по следующей формуле (4) [35]:

$$\theta = \eta_T, \% / 100. \quad (6)$$

По расчетам, значения θ увеличивались с увеличением концентрации LAB. Это было связано с адсорбцией более аддитивных молекул на поверхности цинкового электрода с увеличением концентрации LAB.

Графики зависимости c/θ от c и ожидаемые линейные отношения, полученные с помощью линейной аппроксимации, показаны на рис. 4. Соответствующие значения параметров изотерм, т.е. коэффициента корреляции (R^2) и наклона из рис. 4, приведены в табл. 4.

Как показано в табл. 4, графики зависимости c/θ от c представлены двумя прямыми линиями с наклоном 0.53 и 0.60 в щелочной среде, а значения R^2 были чрезвычайно близки к 1.0. Результаты показали, что адсорбция LAB на поверхности цинковых электродов подчиняется изотерме адсорбции Ленгмюра [36, 37].

Анодные поляризационные кривые цинковых электродов

На рис. 5 приведены кривые анодной поляризации цинковых электродов в 7.0 М растворе гидроксида калия, насыщенном оксидом цинка в присутствии LAB. Как и в предыдущих докладах,

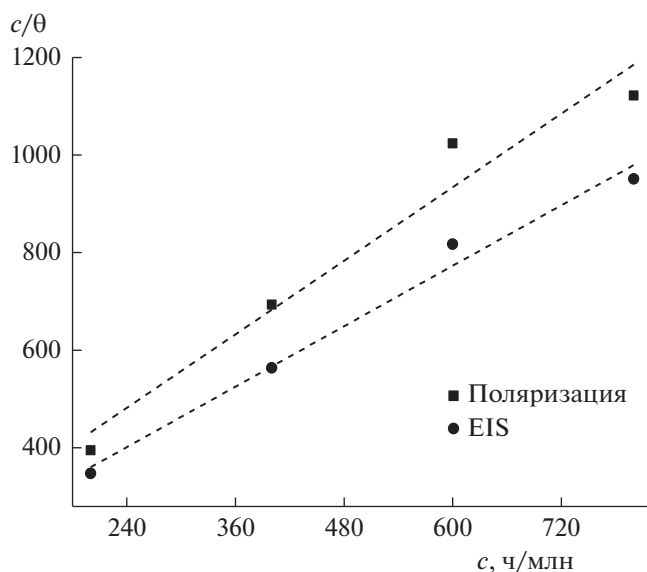


Рис. 4. Графики изотермы адсорбции Ленгмюра для адсорбции LAB на поверхности цинковых электродов в 7.0 М растворе гидроксида калия, насыщенного оксидом цинка, по данным поляризации Тафеля и EIS.

было четко отмечено, что все поляризационные кривые состоят из трех областей, включая область активного растворения, область препассивации и область пассивации [38]. На рис. 5 видно, что с добавлением LAB анодный ток резко снижался по мере того, как потенциал сдвигался к более положительному значению (-0.98 В), что было характерной чертой процесса пассивации цинка. При добавлении различных концентраций LAB потенциалы пассивации смещались положительно с увеличением концентрации LAB (200 и 400 ч/млн), демонстрируя, что пассивация цинкового электрода была подавлена из-за адсорбции LAB. Поскольку концентрации LAB все еще увеличивались (600 и 800 ч/млн), потенциалы пассивации смещались отрицательно и достигали наиболее положительного значения в присутствии 400 ч/млн LAB.

Анализ FE-SEM

На рис. 6 наблюдается микроструктура цинковых электродов после погружения в 7.0 М раствор гидроксида калия, насыщенный оксидом цинка, в течение 30 сут. Как показано на рис. 6а, наблюдалось большое количество вогнутых точек, проявляющих коррозию цинковых электродов в щелочной среде без добавления LAB. Тем не менее, после погружения в 7.0 М растворы гидроксида калия, насыщенные оксидом цинка, содержащие 200, 400, 600 и 800 ч/млн LAB, цинковые электроды имели только гладкие поверхности с неболь-

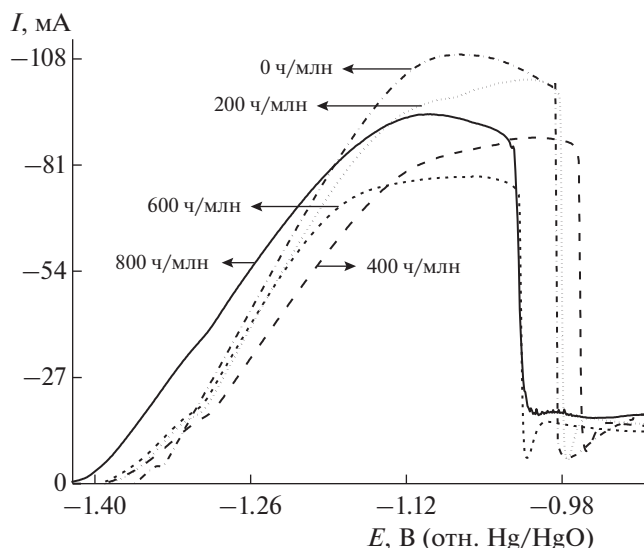


Рис. 5. Анодные поляризационные кривые цинковых электродов в щелочной среде, содержащей различные концентрации LAB.

шим количеством точечных пятен (рис. 6б–6д), демонстрируя что присутствие LAB эффективно замедляло коррозию цинковых электродов. Вкратце, результаты ясно подтвердили, что добавка LAB ингибировала коррозию цинка путем формирования защитной пленки на поверхности цинкового электрода [34].

ВЫВОДЫ

В данной работе ингибирование коррозии и задержка пассивации цинкового электрода в щелочной среде реализуются путем добавления органической добавки LAB. Эффективность ингибирования коррозии повышается с увеличением концентрации LAB, и в присутствии 800 ч/млн LAB эффективность ингибирования достигает максимального значения 84.1%. Кроме того, LAB служит ингибитором катодного типа, и адсорбция LAB соответствует изотерме адсорбции Ленгмюра. Кривые анодной поляризации показывают, что пассивация цинкового электрода подавляется в присутствии 400 ч/млн LAB. Результаты FE-SEM подтверждают, что на поверхности цинкового электрода в присутствии LAB наблюдается меньшее повреждение, демонстрирующее ингибирование коррозии цинка. На основании превосходного ингибирующего свойства, LAB является перспективным кандидатом в качестве добавки к электролиту для улучшения поведения цинка в щелочной среде.

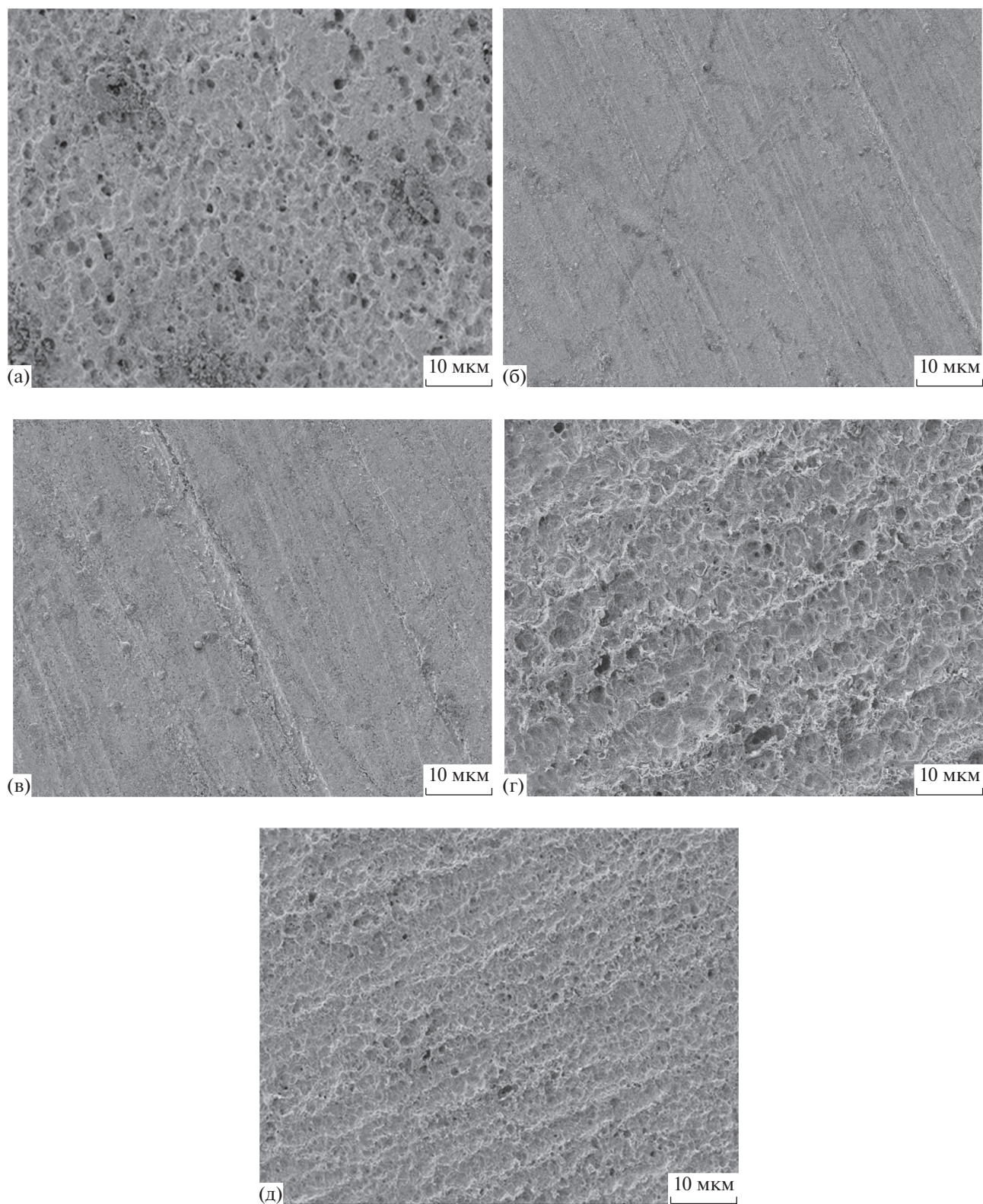


Рис. 6. Изображения FE-SEM цинковых электродов после погружения в 7.0 М раствор гидроксида калия, насыщенный оксидом цинка, в течение 30 сут в отсутствие ЛАВ (а) и в присутствии 200 (б), 400 (в), 600 (г) и 800 ч/млн (д) ЛАВ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Эта работа была поддержана программой поддержки исследований академических талантов Longshan Юго-Западного университета науки и технологии (18LZX322).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ingale, N.D., Gallaway, J.W., and Nyce, M., Rechargeability and economic aspects of alkaline zinc-manganese dioxide cells for electrical storage and load leveling, *J. Power Sources*, 2015, vol. 276, p. 7.
2. Li, Y.G. and Dai, H.J., Recent advances in zinc-air batteries, *Chem. Soc. Rev.*, 2014, vol. 43, no. 15, p. 5257.
3. Tan, Z.Y., Yang, Z.H., and Ni, X., Effects of calcium lignosulfonate on the performance of zinc-nickel battery, *Electrochim. Acta*, 2012, vol. 85, p. 554.
4. Ozgit, D., Hiralal, P., and Amaratunga, G.A.J., Improving performance and cyclability of zinc-silver oxide batteries by using graphene as a two dimensional conductive additive, *ACS Appl. Mater. Interf.*, 2014, vol. 6, no. 23, p. 20752.
5. Gan, W.G., Zhou, D.B., and Zhao, J., Stable zinc anodes by in situ polymerization of conducting polymer to conformally coat zinc oxide particles, *J. Appl. Electrochem.*, 2015, vol. 45, no. 8, p. 913.
6. Liu, S.Z., Han, W., and Cui, B.C., A novel rechargeable zinc-air battery with molten salt electrolyte, *J. Power Sources*, 2017, vol. 342, p. 435.
7. Lee, S.M., Kim, Y.J., and Eom, S.W., Improvement in self-discharge of Zn anode by applying surface modification for Zn-air batteries with high energy density, *J. Power Sources*, 2013, vol. 227, p. 177.
8. Ein-Eli, Y., Auinat, M., and Starosvetsky, D., Electrochemical and surface studies of zinc in alkaline solutions containing organic corrosion inhibitors, *J. Power Sources*, 2003, vol. 114, no. 2, p. 330.
9. Zhou, H.B., Huang, Q.M., and Liang, M., Investigation on synergism of composite additives for zinc corrosion inhibition in alkaline solution, *Mater. Chem. Phys.*, 2011, vol. 128, nos. 1–2, p. 214.
10. Li, X.X., Wang, H.B., and Hu, C., Characteristics of biofilms and iron corrosion scales with ground and surface waters in drinking water distribution systems, *Corros. Sci.*, 2015, vol. 90, p. 331.
11. Hosseini, S., Lao-Atiman, W., Han, S.J., Arpornwichanop, A., Yonezawa, T., and Kheawhom, S., Discharge performance of zinc-air flow batteries under the effects of sodium dodecyl sulfate and pluronic F-127, *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, p. 14909.
12. Zhou, H.B., Huang, Q.M., Liang, M., Lv, D.S., Xu, M.Q., Li, H., and Li, W.S., Investigation on synergism of composite additives for zinc corrosion inhibition in alkaline solution, *Mater. Chem. Phys.*, 2011, vol. 128, nos. 1–2, p. 214.
13. Zhang, C., Wang, J.M., and Zhang, L., Study of the performance of secondary alkaline pasted zinc electrodes, *J. Appl. Electrochem.*, 2001, vol. 31, no. 9, p. 1049.
14. Dobryszycski, J. and Biallozor, S., On some organic inhibitors of zinc corrosion in alkaline media, *Corros. Sci.*, 2001, vol. 43, no. 7, p. 1309.
15. Lee, C.W., Sathiyarayanan, K., and Eom, S.W., Novel electrochemical behavior of zinc anodes in zinc/air batteries in the presence of additives, *J. Power Sources*, 2006, vol. 159, p. 1474.
16. Liu, K.L., He, P., and Bai, H.M., Effects of dodecyltrimethylammonium bromide surfactant on both corrosion and passivation behaviors of zinc electrodes in alkaline solution, *Mater. Chem. Phys.*, 2017, vol. 199, p. 73.
17. Deyab, M.A., Application of nonionic surfactant as a corrosion inhibitor for zinc in alkaline battery solution, *J. Power Sources*, 2015, vol. 292, p. 66.
18. Ghavami, R.K., Rafiei, Z., and Tabatabaei, S.M., Effects of cationic CTAB and anionic SDBS surfactants on the performance of Zn–MnO₂ alkaline batteries, *J. Power Sources*, 2007, vol. 164, no. 2, p. 934.
19. Liang, M., Zhou, H.B., and Huang, Q.M., Synergistic effect of polyethylene glycol 600 and polysorbate 20 on corrosion inhibition of zinc anode in alkaline batteries, *J. Appl. Electrochem.*, 2011, vol. 41, no. 8, p. 991.
20. Bereket, G. and Yurt, A., The inhibition effect of amino acids and hydroxy carboxylic acids on pitting corrosion of aluminum alloy 7075, *Corros. Sci.*, 2001, vol. 43, no. 6, p. 1179.
21. Wen, X., Yang, Z.H., and Xiao, X., The impact of hydrocalumites additives on the electrochemical performance of zinc–nickel secondary cells, *Electrochim. Acta*, 2016, vol. 187, p. 65.
22. Han, P., Chen, C.F., and Li, W.H., Synergistic effect of mixing cationic and nonionic surfactants on corrosion inhibition of mild steel in HCl: experimental and theoretical investigations, *J. Colloid Interf. Sci.*, 2018, vol. 516, p. 398.
23. Zhang, Z., Yang, Z.H., and Huang, J.H., Enhancement of electrochemical performance with Zn–Al–Bi layered hydrotalcites as anode material for Zn/Ni secondary battery, *Electrochim. Acta*, 2015, vol. 155, p. 61.
24. Zheng, X., Zhang, S., and Li, W., Experimental and theoretical studies of two imidazolium-based ionic liquids as inhibitors for mild steel in sulfuric acid solution, *Corros. Sci.*, 2015, vol. 95, p. 168.
25. Raja, P.B., Qureshi, A.K., and Rahim, A.A., Neolamarckia cadamba alkaloids as eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in 1 M HCl media, *Corros. Sci.*, 2013, vol. 69, p. 292.
26. El-Sayed, A.R., Mohran, H.S., and El-Lateef, H.M.A., Effect of minor nickel alloying with zinc on the electrochemical and corrosion behavior of zinc in alkaline solution, *J. Power Sources*, 2010, vol. 195, no. 19, p. 6924.
27. Goulart, C.M., Esteves-Souza, A., and Martinez-Huitle, C.A., Experimental and theoretical evaluation of semicarbazones and thiosemicarbazones as organic corrosion inhibitors, *Corros. Sci.*, 2013, vol. 67, p. 281.

28. Deyab, M.A., Adsorption and inhibition effect of ascorbyl palmitate on corrosion of carbon steel in ethanol blended gasoline containing water as a contaminant, *Corros. Sci.*, 2014, vol. 80, p. 359.
29. Singh, A.K. and Quraishi, M.A., Effect of cefazolin on the corrosion of mild steel in HCl solution, *Corros. Sci.*, 2010, vol. 52, no. 1, p. 152.
30. Kosari, A., Momeni, M., and Parvizi, R., Theoretical and electrochemical assessment of inhibitive behavior of some thiophenol derivatives on mild steel in HCl, *Corros. Sci.*, 2011, vol. 53, no. 10, p. 3058.
31. Machnikova, E., Whitmire, K.H., and Hackerman, N., Corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid by furan derivatives, *Electrochim. Acta*, 2008, vol. 53, no. 20, p. 6024.
32. Foo, K.Y. and Hameed, B.H., Insights into the modeling of adsorption isotherm systems, *Chem. Eng. J.*, 2010, vol. 156, no. 1, p. 2.
33. Tang, Y.M., Yang, X.Y., and Yang, W.Z., A preliminary investigation of corrosion inhibition of mild steel in 0.5 M H₂SO₄ by 2-amino-5-(n-pyridyl)-1,3,4-thiadiazole: polarization, EIS and molecular dynamics simulations, *Corros. Sci.*, 2010, vol. 52, no. 5, p. 1801.
34. Cui, M.J., Ren, S.M., and Zhao, H.C., Novel nitrogen doped carbon dots for corrosion inhibition of carbon steel in 1 M HCl solution, *Appl. Surf. Sci.*, 2018, vol. 443, p. 145.
35. Seifzadeh, D., Basharnavaz, H., and Bezaatpour, A., A Schiff base compound as effective corrosion inhibitor for magnesium in acidic media, *Mater. Chem. Phys.*, 2013, vol. 138, nos. 2–3, p. 794.
36. Amin, M.A. and Lbrahim, M.M., Corrosion and corrosion control of mild steel in concentrated H₂SO₄ solutions by a newly synthesized glycine derivative, *Corros. Sci.*, 2011, vol. 53, no. 3, p. 873.
37. Ahmed, M.H.O., Al-Amiery, A.A., and Al-Majedy, Y.K., Synthesis and characterization of a novel organic corrosion inhibitor for mild steel in 1 M hydrochloric acid, *Results Phys.*, 2018, vol. 8, p. 728.
38. Cabot, P.L., Cortes, M., and Centellas, F., Potentiostatic passivation of zinc in alkaline solutions, *J. Appl. Electrochem.*, 1993, vol. 23, no. 4, p. 371.